基于集对分析模型的岩溶区浅埋穿河隧道突涌水危险性评价

许增光,线美婷,熊伟,高珊,柴军瑞

(西安理工大学西北旱区生态水利国家重点实验室,710048 西安)

摘　要:在岩溶区修建隧道常会面临突涌水等地质灾害,尤其是对于浅埋穿河隧道的建设,更是极具挑战性的一项工作。由于隧址区存在断层破碎带、岩体风化程度高、节理裂隙发育等,使得河水入侵隧道的可能性大幅增加。为了有效评价岩溶区浅埋隧道下穿河段突涌水发生的危险性,本研究根据隧址区地质条件及隧道特征,选取了地层岩性、修正的岩层倾角、可溶岩与非可溶岩接触带、围岩等级、断层带宽度、断层性质、裂隙发育程度、地表水流量、地表汇水面积、隧道埋深、施工干扰程度共 11 个影响突涌水的关键因素作为评价指标,建立了岩溶区浅埋穿河隧道突涌水危险性评价体系。首先,采用层次分析法构造判断矩阵确定评价指标的权重,利用集对分析法计算各评价指标的联系度,进而确定评价样本的综合联系度;其次,运用最大隶属度原则识别突涌水风险等级;最后,根据危险性等级与涌水量之间的对应关系,可初步预测突涌水量范围。针对跃龙门隧道下穿高川河浅埋段的突涌水风险,采用集对分析模型进行分析,计算结果显示,危险性评价预测的突涌水量范围为 3 000 ~ 10 000 m^3/d,现场开挖实际涌水量为 7 000 m^3/d。即危险性评价结果与现场实际情况基本一致,验证了该评价体系与方法的合理性及可行性,为岩溶区浅埋隧道下穿河段突涌水风险评估提供了有效支撑。

关键词:岩溶区;浅埋穿河隧道;突涌水;危险性评价;集对分析

中图分类号:U458　　**文献标志码:**A

Risk assessment of water inrush in karst shallow tunnel under river based on SPA model

XU Zengguang, XIAN Meiting, XIONG Wei, GAO Shan, CHAI Junrui

(State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, 710048 Xi'an, China)

Abstract: Tunnel construction in karst area often faces geological disasters such as water inrush, especially for the construction of shallow tunnel under river, which is a very challenging work. Due to the in situ fault fracture zone, high weathering degree of rock mass, and the development of joints and fissures in the tunnel site, the possibility of river water intrusion into the tunnel is greatly increased. In order to effectively evalu-

收稿日期:2021-02-18　　**修回日期:**2022-04-05
基金项目:引汉济渭联合基金资助项目(No. 2019JLM-57)
通信作者:许增光,教授。E-mail:xuzengguang@ xaut. edu. cn
引用格式:许增光,线美婷,熊伟,等. 基于集对分析模型的岩溶区浅埋穿河隧道突涌水危险性评价[J]. 应用力学学报,2023,40(1):135-145.
XU Zengguang, XIAN Meiting, XIONG Wei, et al. Risk assessment of water inrush in karst shallow tunnel under river based on SPA model[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2023, 40(1):135-145.

ate the risk of water inrush in karst shallow tunnel under river, according to the geological conditions and tunnel characteristics of the tunnel site, 11 factors affecting the water inrush, such as formation lithology, modified strata inclination, soluble and insoluble rock contact zones, surrounding rock grade, fault zone width, fault property, fissure development degree, surface water flow, surface catchment area, buried depth of tunnel, construction disturbance degree, are selected as the evaluation indexes, and the risk evaluation system of karst shallow tunnel under river is established. The analytic hierarchy process (AHP) was used to construct judgment matrix to determine the weight of evaluation indexes, the set pair analysis method was used to calculate the connection degree of each evaluation index, and then the comprehensive connection degree of evaluation samples was determined. Secondly, the maximum membership degree principle was used to identify the risk level of water inrush. Finally, according to the corresponding relationship between the risk level and the water inflow, the scope of water inrush inflow can be preliminarily predicted. In view of the risk of water inrush in shallow buried section of Yuelongmen Tunnel under-crossing Gaochuan River, the set pair analysis model was used to analyze the risk. The calculation results show that the range of water inrush volume predicted by the risk assessment is 3 000 ~ 10 000 m^3/d, and the actual water inflow from site excavation is 7 000 m^3/d. That is to say, the results of risk assessment are basically consistent with the actual situation, which verifies the rationality and feasibility of the evaluation system and method and provides effective support for risk assessment of water inrush of karst shallow tunnel under river.

Key words: karst area; shallow tunnel under river; water inrush; risk assessment; set pair analysis

随着基础设施的快速发展,各种地下工程犹如雨后春笋般涌现,比如跨流域调水、强富水岩溶区修建隧洞、地铁高铁轨道以及采矿工程等。这其中隧洞会跨越各种复杂地形,遇到高地应力、岩爆、断层破碎带、浅埋、突涌水等问题,给施工造成极大的困难。其中突涌水问题极为致命,轻则冲毁机具,重则造成人员伤亡,延误工期,造成大量财产损失。

近年来国内外学者针对岩溶区隧道突涌水风险评价体系及方法作了大量研究。李术才和周宗青等[1-3]选取7个主要致灾因子,构成了设计阶段和施工阶段的突水风险评价体系,建立了岩溶隧道突涌水危险性等级评价的属性识别模型。CHU 和 LI 等[4-5]基于模糊数学理论和层次分析法,提出了一种准确可行的模糊综合评价方法,用以评价岩溶隧道的突水风险。PENG 等[6]在对影响因素进行综合分析的基础上,提出了 8 项评价指标和相应的分级标准,综合了标准化过程和层次分析法,建立了一种新型的云模型来评估隧道突水风险。王媛等[7]针对复杂的深部地质环境,提出了以断裂控水模型为基础的多因素综合评判方法。张顶立等[8]建立了隧洞围岩变形与海床安全性之间的联系,由此对海底隧道施工过程中的突涌水风险进行实时预测评估。许振浩等[9]基于层次分析法分析了岩溶隧道突水、突泥的致灾因素与权值,提出了突水、突泥风险的 3 阶段评估与控制方法。LI 等[10]利用地理信息系统(geographic information system, GIS)技术研究岩溶隧道突水风险评估系统,动态预测突水风险,并制定相应的防护措施。WANG 等[11]考虑了岩溶水文和工程地质条件,选择了几个主要影响因素作为评价指标,采用了集对分析法对突水风险进行评估。

在上述岩溶隧道突涌水危险性评价研究中,学者们针对致灾因子的遴选、评价体系的构建及评价模型的建立做了大量工作。岩溶区浅埋穿河隧道地质构造复杂,岩溶形成的地下水系统与地表水系统有着密切的联系,其中地表水对隧道稳定性的影响比地下水更为显著。当隧道下穿河流、湖泊、海洋或水库时,在施工扰动下,上覆地表水源会通过断层破碎带、岩性接触带、节理裂隙发育带等不良地质条件与隧道发生水力联系,水量丰富时,会引起严重的突涌水事故[12-15]。本研究受众多评价体系与突涌水实例的启发,提出了岩溶区浅埋穿河隧洞突涌水危险性评价体系,并结合集对分析模型将其应用于跃龙门隧道下穿高川河浅埋段,为同类工程提供了一种有效的评价方法。

1 集对分析原理

突水是一个典型的不确定问题,它是隧道工程与岩溶隧道水环境相互作用的结果。施工环境是主要原因,存在一定的不确定性。由于工程地质和水文地质条件复杂,传统方法在评价突水风险水平时存在困难。集对分析(set pair analysis,SPA)由我国学者赵克勤(1989)提出[16],用于处理系统确定性和不确定性之间的相互作用。这一理论的本质是将确定性和不确定性视为一个确定-不确定系统。这种处理可以通过研究物体的确定性和不确定性之间的关系来实现。

对于给定的问题 W,将集合 A 和集合 B 放在一起组成集合对 $H=(A,B)$,其联系度方程可以描述为

$$\boldsymbol{\mu}_{(A,B)}=\frac{S}{N}+\frac{F}{N}i+\frac{P}{N}j \tag{1}$$

式中:$\boldsymbol{\mu}$ 为集合 A 和 B 的联系度;N 为集合对 H 特性的总数;S 为集合对共同具用特性数;P 为相互对立的特性数;F 为 2 个集合既不相互对立,又不共同具有特性的个数;$\frac{S}{N}$、$\frac{F}{N}$、$\frac{P}{N}$分别是集合对 A 和 B 的同一度、差异度和对立度;i 表示差异度系数,$i\in[-1,1]$;j 表示对立度系数,$j=-1$。

令 $a=\frac{S}{N}$,$b=\frac{F}{N}$,$c=\frac{P}{N}$,式(1)可以表示为

$$\boldsymbol{\mu}=a+bi+cj \tag{2}$$

式(2)称为一般连接度或三元连接度;其中,$a>0$,$b>0$,$c>0$ 且 $a+b+c=1$。

然而,有些问题可能存在不止一种差异程度。因此,有必要对三元连接度的基本公式进行不同程度的扩展。扩展后的多元连接度描述为

$$\boldsymbol{\mu}_{(A,B)}=\frac{S}{N}+\frac{F_1}{N}i_1+\frac{F_2}{N}i_2+\cdots+\frac{F_{k-2}}{N}i_{k-2}+\frac{P}{N}j \tag{3}$$

根据定义,可以将式(3)简写为

$$\boldsymbol{\mu}=a+b_1i_1+b_2j_2+\cdots+b_{k-2}i_{k-2}+cj \tag{4}$$

式中:$i_1,i_2,\cdots,i_{k-2}$ 表示差异度系数;j 表示对立度系数。

2 评价指标体系的建立

岩溶隧洞突涌水的影响因素众多,其中充足的水源是突水发生的前提,断层带、岩性接触带、节理裂隙发育带等则为突水提供了运移通道。此外,岩体质量等级、风化程度、隧道位置及开挖方式也很大程度决定了隧洞施工的安全性。各影响因素对突涌水的致灾程度是不同的,并且在实际工程中,各因素间相互作用、相互影响。参考其他学者[1-3,5-6,9]对突涌水的研究,可知岩溶区隧道施工过程中地层岩性、岩层倾角、岩性接触带、断层破碎带、地表汇水面积等因素会导致突涌水的发生。深埋隧道下穿河流时(图 1a),由于隧道埋深较大,且连接通道贯通性差,故地表水源对突涌水影响较小,拱顶所受的水头压力主要来自于地下水位或其他含水构造。浅埋穿河隧道(图 1b)围岩的力学、水力学特性较深埋隧道有所不同。由于隧道埋深浅,地下水位的影响可以忽略不计,而地表水源距离隧道拱顶很近,在施工干扰下,地表水是一个很危险的致灾因素,隧道埋深越浅,裂隙处地表水流量越大,地表河流侵入隧道的可能性就越高。因此,在浅埋穿河隧道突涌水危险性分析中,地表水流量、隧道埋深及施工干扰度也是重要的致灾因素。

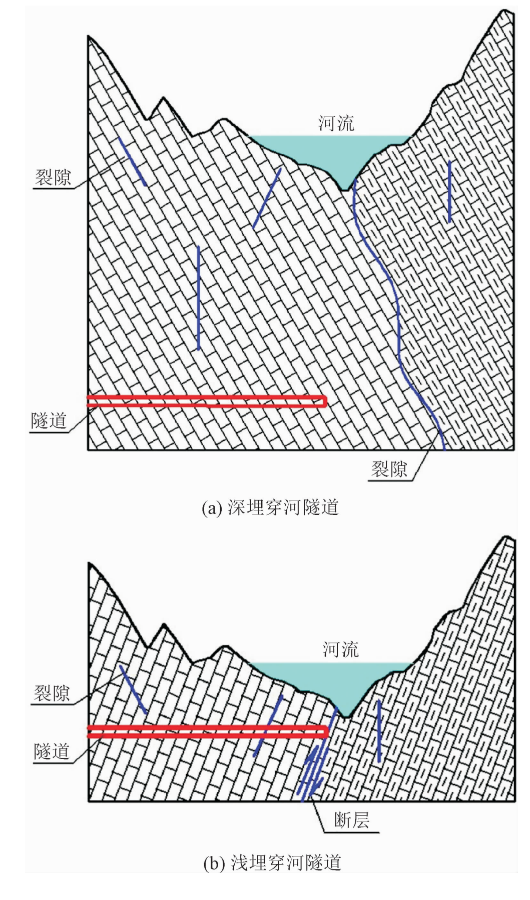


图 1 岩溶隧道下穿河流示意图

Fig. 1 Schematic diagram of karst tunnel under-crossing river

结合浅埋穿河隧道的特征,本研究从工程地质、地质构造、水文地质及隧道特征 4 个方面分析,综合选取了地层岩性、岩层倾角、可溶岩与非可溶岩接触带、围岩等级、断层带宽度、断层性质、节理裂隙发育程度、地表河流规模、地表汇水面积、隧道埋深和施工干扰度共 11 个主要影响因素,建立了岩溶区浅埋穿河隧洞突涌水危险性评价体系(图 2)。按照量化的影响因素,制定了突水风险水平标准,并将隧洞突涌水风险由低到高划分为Ⅳ级(微/无)、Ⅲ级(低)、Ⅱ级(中等)和Ⅰ级(高)4 个等级,评价指标与相应的分级标准如表 1 所示。

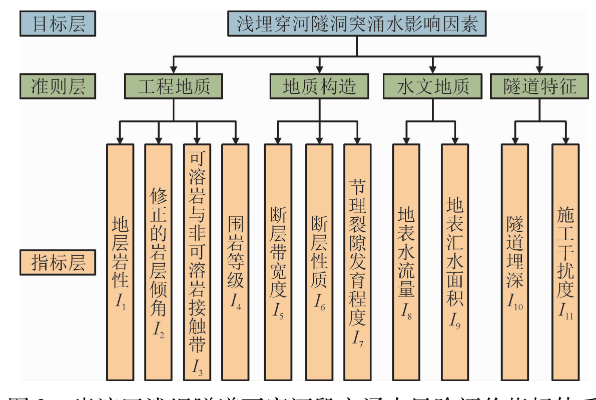


图 2　岩溶区浅埋隧道下穿河段突涌水风险评价指标体系

Fig. 2　Risk assessment index system of water inrush in karst shallow tunnel under river

表 1　突水评价指标及分级标准

Tab. 1　Evaluation indexes and classification standard of water inrush

评价指标	Ⅳ(微/无)	Ⅲ(低)	Ⅱ(中等)	Ⅰ(高)
地层岩性 I_1	不可溶	弱可溶	中等可溶	强可溶
分值	0~0.042	0.042~0.104	0.104~0.254	0.254~0.404
修正的岩层倾角 I_2/(°)	0~5	5~10	10~25	25~45
可溶岩与非可溶岩接触带 I_3	不/微发育	弱发育	中等发育	强发育
分值	100~85	85~70	70~60	60~0
围岩等级 I_4	Ⅰ Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ Ⅵ
分值	100~85	85~70	70~60	60~0
断层带宽度 I_5/m	0~1	1~5	5~10	>10
断层性质 I_6	压性	扭性	张扭性	张性
分值	100~85	85~70	70~60	60~0
节理裂隙发育程度 I_7	不/微发育	弱发育	中等发育	强发育
分值	100~85	85~70	70~60	60~0
地表水流量 I_8/($10^4 m^3 \cdot d^{-1}$)	0~0.5	0.5~1	1~5	5~10
地表汇水面积 I_9/m^2	<5	5~7.5	7.5~10	>10
隧道埋深 I_{10}/m^2	100~60	60~40	40~20	20~0
施工干扰度 I_{11}	无/微	弱	中等	强
分值	100~85	85~70	70~60	60~0

注:对于定性指标,采用专家评价打分来定量划分等级[2,11]。

2.1　工程地质

隧道施工经过石灰岩、白云岩等可溶岩层时,外界供水充足时容易发生突涌水灾害。岩石溶解度是岩溶发育的物质基础。地层岩性纯度越高,单层厚度越大,岩溶发育程度越高,越容易形成大型岩溶管道。根据岩石的溶解度,可分为非可溶岩、弱可溶岩、中等可溶岩和强可溶岩 4 级[9]。

岩层产状对岩溶区的扩展和发育有着重要影响,且水平岩层比垂直岩层更发育。地下水在岩层中的渗透性呈各向异性,水平方向上的渗透性远大于垂直方向。周宗青等[3]在已有文献的基础上,修正了岩层倾角并提出了相应的分类标准。本研究将修正后的岩层倾角划分为 4 个等级,如表 1 所示。

地层中的可溶岩区域地下水活动较为剧烈,存在有松散岩类孔隙水、碳酸盐岩类岩溶水和基岩裂隙水。若接触带处水量丰富,将加速可溶岩层的溶蚀和岩溶发育,形成大型溶洞和裂隙系统,为地下水的储存、补给和径流提供空间和渠道。根据接触带对岩溶发育的影响,可分为不/微利、弱有利、中等有利和强有利于岩溶发育四级。

岩溶区浅埋穿河隧道施工时,岩体质量等级及风化程度对突涌水也有较大影响[12]。如果岩体破碎或存在不利结构面,则其抵抗开挖扰动的能力较低,发生突水事故的可能性较大。岩体质量以围岩等级表示,分为 4 个等级。Ⅰ级和Ⅱ级岩体相对完

整,对突水的影响最小。Ⅲ级和Ⅳ级分别是中等风化和高度风化的岩石。Ⅴ级和Ⅵ级为全风化岩石,在隧道施工中发生突水的可能性最大。

2.2 地质构造

施工过程中出现的大规模突水、突泥与不利的地质条件密切相关。突涌水的运移通道规模用断层带宽度表示,导水性能由断层性质决定。根据致灾强度,将断层带宽度定量划分为 0 ~ 1 m、1 ~ 5 m、5 ~ 10 m、> 10 m,共 4 个等级;断层性质也可定性描述为压性、扭性、张扭性和张性[17],其中压性断层的导水性最弱,张性断层的导水性最强。

裂隙发育程度是影响水力传导的主要因素。随着裂隙的发育,岩体的完整性和强度受到破坏,渗透率增大,为地下水的赋存和运移提供了条件。隧道施工穿越裂隙发育的地层,发生突涌水事故的可能性较大。根据岩体裂隙发育程度对突涌水的影响,将其划分为不/微发育、弱发育、中等发育和强发育 4 个等级。

2.3 水文地质

浅埋穿河隧道的施工引起了国内外学者的广泛关注,从已有的研究中可以看出,断层、节理裂隙处的地表水流量和突涌水量之间有着直接联系[13]。浅埋隧道在穿越断层带或裂隙发育带时,地表水流量越大,施工扰动下突水的可能性越大。根据地表水流量对突涌水的贡献程度,可划分为 4 个等级,见表 1。

充足的水源是突水的前提,地表集水区的水可以通过断层、裂隙等渗漏通道补给地下水,因此对突涌水灾害的影响较大,靠近地表水体的地下水尤为丰富。参考文献[2-3],将地表汇水面积定量划分为 4 个等级,如表 1 所示。

隧道施工区的地质条件基本相同时,若地表汇水面积一定,断层、节理裂隙处的地表水流量越大,涌入隧道的水量越多;同理,断层、节理裂隙处的地表水流量一定时,地表汇水面积越广,则集水区的补给能力越强,涌水的可能性也越大。

2.4 隧道特征

浅埋穿河隧道施工时,埋深是一个重要的致灾因素,隧道埋深越浅,围岩自然拱及其自身稳定能力就越弱,因此,开挖会进一步影响浅地表层。也就是说,隧道拱顶距离地表水源越近,地表水侵入隧道的可能性就越高。根据浅覆盖层隧道埋深的致灾程度[18],将其定量划分为 60 ~ 100 m、40 ~ 60 m、20 ~ 40 m、0 ~ 20 m,共 4 个等级。

当隧道未施工时,应力状态平衡,岩体稳定。在开挖过程中,施工扰动会导致围岩失稳或破坏含水层,从而加速突水通道的形成。因此,施工扰动程度也被考虑为浅埋穿河隧道突涌水的致灾因素。根据施工扰动对突涌水致灾程度的递增顺序,可将施工扰动造成的破坏分为无、弱、中、强 4 个层次。

3 突涌水风险评价的集对分析模型

基于当前集对分析模型的算法,建立了岩溶区浅埋穿河隧道突涌水危险性评价体系。集对分析模型由两部分组成:①根据各评价指标的实测值和联系度函数,建立单指标隶属度;②通过构造各评估指标的重要度判断矩阵,获得权重值。结合单指标隶属度和权重,可以得出隧道突涌水风险评价的平均联系度,进而确定突涌水危险性等级,并预测出相应的水量范围。集对分析模型的基本框架介绍如图 3 所示。

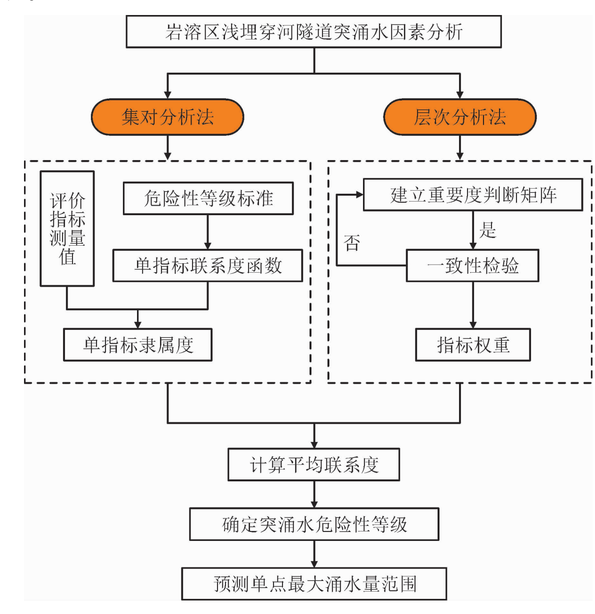


图 3 集对分析模型预测突涌水量实现流程

Fig. 3 A flowchart for the realization of the set pair analysis model to predict the water inrush flow

3.1 确定突涌水风险评价等级的四元连接度

设隧道突涌水评价对象为集合 $C_m(x_1, x_2, \cdots, x_m)$ 与评价指标等级标准集合 B_k 构成集对 $H(C_m, B_k)$,然后确定集对的联系度 $\boldsymbol{\mu}(C_m, B_k)$。将Ⅰ级标

准编制的评价指标定义为一致度，Ⅳ级标准编制的评价指标定义为对立度，Ⅱ级和Ⅲ级标准编制的评价指标定义为差异度。根据集对分析原理的多元连接度基本公式(3)和(4)，确定突涌水风险评价的四元连接度如下所示。

$$\mu_n = \frac{S}{N} + \frac{F_1}{N}i_1 + \frac{F_2}{N}i_2 + \frac{P}{N}j = a + b_1 i_1 + b_2 i_2 + cj \tag{5}$$

式中：n 为第 n 个待评价的隧洞风险段落；N 为评价指标总数；S 为符合Ⅰ级标准的指标个数；F_1 为符合Ⅱ级标准的指标个数；F_2 为符合Ⅲ级标准的指标个数；P 为符合Ⅳ级标准的指标个数。

3.2 建立各评价指标的联系度

对于“大者为优”收益型指标(C_1、C_2、C_5、C_8、C_9)：突涌水风险水平随着指标数值的增加而增加，$k>2$，$S_1 \geqslant S_2 \geqslant \cdots \geqslant S_K$。其等级联系度可描述为[11,19-20]

$$\mu_{nk} = \begin{cases} 1 + 0i_1 + 0i_2 + 0j & x \in [S_{\mathrm{I}}, +\infty] \\ \dfrac{x - S_{\mathrm{II}}}{S_{\mathrm{I}} - S_{\mathrm{II}}} + \dfrac{S_{\mathrm{I}} - x}{S_{\mathrm{I}} - S_{\mathrm{II}}}i_1 + 0i_2 + 0j & x \in [S_{\mathrm{II}}, S_{\mathrm{I}}] \\ 0 + \dfrac{x - S_{\mathrm{III}}}{S_{\mathrm{II}} - S_{\mathrm{III}}}i_1 + \dfrac{S_{\mathrm{II}} - x}{S_{\mathrm{II}} - S_{\mathrm{III}}}i_2 + 0j & x \in [S_{\mathrm{III}}, S_{\mathrm{II}}] \\ 0 + 0i_1 + \dfrac{x - S_{\mathrm{IV}}}{S_{\mathrm{III}} - S_{\mathrm{IV}}}i_2 + \dfrac{S_{\mathrm{III}} - x}{S_{\mathrm{III}} - S_{\mathrm{IV}}}j & x \in [S_{\mathrm{IV}}, S_{\mathrm{III}}] \\ 0 + 0i_1 + 0i_2 + 1j & x \in [0, S_{\mathrm{IV}}] \end{cases} \tag{6}$$

对于“小者为优”成本型指标(C_3、C_4、C_6、C_7、C_{10}、C_{11})：突涌水风险水平随着指标数值的增大而降低，$k>2$，$S_1 \leqslant S_2 \leqslant \cdots \leqslant S_K$。其等级联系度可描述为[11,19-20]

$$\mu_{nk} = \begin{cases} 1 + 0i_1 + 0i_2 + 0j & x \in [0, S_{\mathrm{I}}] \\ \dfrac{S_{\mathrm{II}} - x}{S_{\mathrm{II}} - S_{\mathrm{I}}} + \dfrac{x - S_{\mathrm{I}}}{S_{\mathrm{II}} - S_{\mathrm{I}}}i_1 + 0i_2 + 0j & x \in [S_{\mathrm{I}}, S_{\mathrm{II}}] \\ 0 + \dfrac{S_{\mathrm{III}} - x}{S_{\mathrm{III}} - S_{\mathrm{II}}}i_1 + \dfrac{x - S_{\mathrm{II}}}{S_{\mathrm{III}} - S_{\mathrm{II}}}i_2 + 0j & x \in [S_{\mathrm{II}}, S_{\mathrm{III}}] \\ 0 + 0i_1 + \dfrac{S_{\mathrm{IV}} - x}{S_{\mathrm{IV}} - S_{\mathrm{III}}}i_2 + \dfrac{x - S_{\mathrm{III}}}{S_{\mathrm{IV}} - S_{\mathrm{III}}}j & x \in [S_{\mathrm{III}}, S_{\mathrm{IV}}] \\ 0 + 0i_1 + 0i_2 + 1j & x \in [S_{\mathrm{IV}}, +\infty] \end{cases} \tag{7}$$

式中：n 表示第 n 个评价样本；k 表示第 k 个评价指标；x 表示待评价隧洞突涌水影响因素的实测值；S_{I}、S_{II}、S_{III}、S_{IV} 分别表示Ⅰ～Ⅳ级标准值。

3.3 AHP 确定指标权重

AHP(层次分析法)由 SAATY 在 20 世纪 80 年代提出[21]，是一种定性分析与定量分析相结合的多准则决策方法，目的是通过数学方法为决策和评价提供依据。基于 SAATY 提出的 1-9 标度法，可获得各级指标的判断矩阵。矩阵的权重向量可以表示为

$$\overline{W_i} = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^{n} a_{ij}}, \quad (i = 1,2,\cdots,n) \tag{8}$$

$$W_i = \frac{\overline{W_i}}{\sum_{j=1}^{n} \overline{W_i}}, \quad (i = 1,2,\cdots,n) \tag{9}$$

建立图 1 中一级指标和二级指标的判断矩阵，并检验一致性(具体计算步骤可参考文献[22-23]的研究)，汇总如表 2 所示。

表 2 各层元素对目标层的权重

Tab. 2 The weight of each layer element to the target layer

目标层	准则层	权重	指标层	权重	综合权重
突水风险评价指标	工程地质	0.289	地层岩性 I_1	0.279	0.081
			修正的岩层倾角 I_2	0.076	0.022
			可溶岩与非可溶岩接触带 I_3	0.357	0.103
			围岩级别 I_4	0.288	0.083
	地质构造	0.289	断层带宽度 I_5	0.411	0.119
			断层性质 I_6	0.261	0.075
			节理裂隙发育程度 I_7	0.328	0.095
	水文地质	0.246	地表水流量 I_8	0.500	0.123
			地表汇水面积 I_9	0.500	0.123
	隧道特征	0.176	隧道埋深 I_{10}	0.750	0.132
			施工干扰度 I_{11}	0.250	0.044

3.4 平均联系度的计算

各指标对于隧道突涌水的致灾程度不尽相同,故此处对文献[11,19]中平均联系度的计算稍作改进。设第 n 个评价样本的平均联系度为 $\bar{\boldsymbol{\mu}}_n$,根据指标权重向量 $\boldsymbol{W}_i$ 和各指标分级联系度 $\boldsymbol{\mu}_{nk}$,计算公式为

$$\bar{\boldsymbol{\mu}}_n = \sum_{k=1}^{11} \boldsymbol{W}_i \times \boldsymbol{\mu}_{nk} \tag{10}$$

其中:n 为第 n 个评价样本;k 为第 k 个评价指标;$\boldsymbol{W}_i$ 为第 i 个评价指标的权重。

3.5 危险性等级的确定

求出平均联系度 $\bar{\boldsymbol{\mu}}_n$ 后,用式(10)处理式(5),并按式(11)对同一、差异、对立各分量进行归一化处理,即可得到如式(12)所示的待评价隧洞段 n 的综合联系度 $\bar{\boldsymbol{\mu}}'_n$。

$$\begin{cases} \bar{\mu}'_{n,\mathrm{I}} = \dfrac{a\bar{\mu}_{n,\mathrm{I}}}{a\bar{\mu}_{n,\mathrm{I}} + b_1\bar{\mu}_{n,\mathrm{II}} + b_2\bar{\mu}_{n,\mathrm{III}} + c\bar{\mu}_{n,\mathrm{IV}}} \\ \bar{\mu}'_{n,\mathrm{II}} = \dfrac{b_1\bar{\mu}_{n,\mathrm{II}}}{a\bar{\mu}_{n,\mathrm{I}} + b_1\bar{\mu}_{n,\mathrm{II}} + b_2\bar{\mu}_{n,\mathrm{III}} + c\bar{\mu}_{n,\mathrm{IV}}} \\ \bar{\mu}'_{n,\mathrm{III}} = \dfrac{b_2\bar{\mu}_{n,\mathrm{III}}}{a\bar{\mu}_{n,\mathrm{I}} + b_1\bar{\mu}_{n,\mathrm{II}} + b_2\bar{\mu}_{n,\mathrm{III}} + c\bar{\mu}_{n,\mathrm{IV}}} \\ \bar{\mu}'_{n,\mathrm{IV}} = \dfrac{c\bar{\mu}_{n,\mathrm{IV}}}{a\bar{\mu}_{n,\mathrm{I}} + b_1\bar{\mu}_{n,\mathrm{II}} + b_2\bar{\mu}_{n,\mathrm{III}} + c\bar{\mu}_{n,\mathrm{IV}}} \end{cases} \tag{11}$$

$$\bar{\boldsymbol{\mu}}'_n = \bar{\mu}_{n,\mathrm{I}} + \bar{\mu}_{n,\mathrm{II}} i_1 + \bar{\mu}_{n,\mathrm{III}} i_2 + \bar{\mu}_{n,\mathrm{IV}} j \tag{12}$$

每种方法都有各自的评价标准。对于 SPA,选择最大隶属原则作为其评价标准。最大隶属原则简单,操作方便。根据这一原理,选取最大联系度 δ 所对应的突涌水级别为待评价隧洞段的危险性等级。在此条件下,置信度系数考虑为 1.0。其计算公式为

$$\delta = \max\{\bar{\mu}'_{n,\mathrm{I}}, \bar{\mu}'_{n,\mathrm{II}}, \bar{\mu}'_{n,\mathrm{III}}, \bar{\mu}'_{n,\mathrm{IV}}\} \tag{13}$$

3.6 基于危险性等级的突涌水量范围预测

根据李术才和许振浩等[2,9]对岩溶隧道突涌水危险性等级的研究,将 4 个等级对应的水量进行划分,如表 3 所示。

表 3 隧道突水风险等级与水量划分[2]

Tab. 3 Risk grade and water quantity division of water inrush in tunnel[2]

危险性等级	Ⅳ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅰ
涌水量/($m^3 \cdot d^{-1}$)	<500	500~3 000	3 000~10 000	>10 000

4 工程应用:跃龙门隧道下穿高川河段

4.1 工程背景

成兰铁路跃龙门隧道采用双洞分工修建,左线全长 19 974.3 m,右线全长 20 044.0 m,隧道埋深较大,坡度单一,最大埋深为 1 445.5 m。该隧道穿越多条地质断裂带及影响带,围岩软弱,Ⅳ、Ⅴ级围岩占全线长的 91%,同时隧道内充斥着危及施工人员安全的 H_2S 和高瓦斯有害气体,施工风险较大,施工难度极高,是业内公认的中国最难和罕见的铁路项目,被誉为在“豆腐渣”上打隧道。

研究区位于隧道下穿高川河浅埋段 YD2K94+621~YD2K94+701,隧道最小埋深仅为 51 m,工程地质情况如图 4 所示。

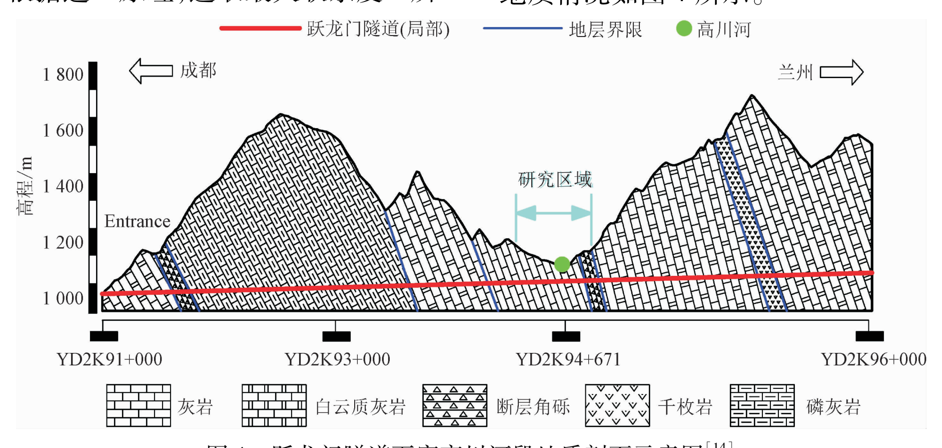


图 4 跃龙门隧道下穿高川河段地质剖面示意图[14]

Fig. 4 Geological profile of Yuelongmen Tunnel under-crossing Gaochuan River[14]

隧址区山间河流众多，且河流均为沟谷中的常年性流水，隧道施工期恰逢雨季，河流水量丰富。地质条件复杂，掌子面岩性以灰岩为主，围岩等级Ⅳ级，岩体较破碎，稳定性差，节理裂隙较发育[14]。因此，容易发生滑坡、泥石流和突涌水灾害。为了保证评价结果更接近实际情况，本研究从专家评价、统计分析和相关文献[14,24]中获得相应数据，将工程区的实测资料汇总如表4所示。

表4 跃龙门隧道 YD2K94+621～YD2K94+701 段数据特征表

Tab. 4 Data characteristics table of YD2K94+621～YD2K94+701 section of Yuelongmen Tunnel

评价指标	现场实际情况	评价值
I_1	灰岩、夹泥质灰岩	$t=0.104$
I_2	测量值:80°	修正值: $\varphi=10+(80-80)=10$
I_3	接触带强～中等有利于岩溶发育	65 分
I_4	Ⅳ	70 分
I_5	1.5 m	1.5 m
I_6	条带状挤压破碎带(压性)	90 分
I_7	中等发育	70 分
I_8	$91.411\ 2\times10^4\ \mathrm{m^3\cdot d^{-1}}$	$91.411\ 2\times10^4\ \mathrm{m^3\cdot d^{-1}}$
I_9	$S=12\ \mathrm{km^2}$	$12\ \mathrm{km^2}$
I_{10}	51 m	51 m
I_{11}	微弱	85 分

4.2 突涌水危险性评价

基于突涌水危险性评价的集对分析模型，计算跃龙门隧道 YD2K94+621～YD2K94+701 段穿越高川河浅埋段的风险等级。

利用等式(5)，求得高川河段突涌水风险的集对分析联系度为

$$\boldsymbol{\mu}_1=\frac{2}{11}+\frac{6}{11}i_1+\frac{2}{11}i_2+\frac{1}{11}j \tag{14}$$

根据式(6)～(7)，求得高川河段每个评价因子的实测评价值相对于评价分级标准的联系度如下。

$$\begin{cases}\boldsymbol{\mu}_{1,1}=0+0i_1+1i_2+0j\\ \boldsymbol{\mu}_{1,2}=0+0i_1+1i_2+0j\\ \boldsymbol{\mu}_{1,3}=0.5+0.5i_1+0i_2+0j\\ \boldsymbol{\mu}_{1,4}=0+1i_1+0i_2+0j\\ \boldsymbol{\mu}_{1,5}=0+0i_1+0.125i_2+0.875j\\ \boldsymbol{\mu}_{1,6}=0+0i_1+0.666\,7i_2+0.333\,3j\\ \boldsymbol{\mu}_{1,7}=0+1i_1+0i_2+0j\\ \boldsymbol{\mu}_{1,8}=1+0i_1+0i_2+0j\\ \boldsymbol{\mu}_{1,9}=1+0i_1+0i_2+0j\\ \boldsymbol{\mu}_{1,10}=0+0.45i_1+0.55i_2+0j\\ \boldsymbol{\mu}_{1,11}=0+0i_1+1i_2+0j\end{cases} \tag{15}$$

根据各评价指标对应的权重和式(10)，求得平均联系度$\bar{\boldsymbol{\mu}}_n$为

$$\bar{\boldsymbol{\mu}}_n=\begin{bmatrix}0.081\\0.022\\0.103\\0.083\\0.119\\0.075\\0.095\\0.123\\0.123\\0.132\\0.044\end{bmatrix}^{\mathrm T}\begin{bmatrix}0+0i_1+1i_2+0j\\0+0i_1+1i_2+0j\\0.5+0.5i_1+0i_2+0j\\0+1i_1+0i_2+0j\\0+0i_1+0.125i_2+0.875j\\0+0i_1+0.666\,7i_2+0.333\,3j\\0+1i_1+0i_2+0j\\1+0i_1+0i_2+0j\\1+0i_1+0i_2+0j\\0+0.45i_1+0.55i_2+0j\\0+0i_1+1i_2+0j\end{bmatrix}$$
$$=0.297\,5+0.288\,9i_1+0.284\,5i_2+0.129\,1j \tag{16}$$

将式(14)与(16)代入式(11)中，并经归一化处理得到待评价洞段Ⅰ级到Ⅳ级的集对分析联系度为

$$\bar{\mu}_{n,\mathrm{I}}=0.196\,6,\ \bar{\mu}_{n,\mathrm{II}}=0.572\,7,$$
$$\bar{\mu}_{n,\mathrm{III}}=0.188\,0,\ \bar{\mu}_{n,\mathrm{IV}}=0.042\,7 \tag{17}$$

因此，可确定待评价洞段的突涌水风险综合联系度$\bar{\boldsymbol{\mu}}'_n$为

$$\bar{\boldsymbol{\mu}}'_n=0.199\,6+0.572\,7i_1+0.188\,0i_2+0.042\,7j \tag{18}$$

依据最大隶属度原则，可知 $\delta=\max\{0.199\,6,0.572\,7,0.188\,0,0.042\,7\}=0.572\,7$。即高川河段发生突涌水的危险性等级为Ⅱ级(中等)，根据表3，预测该段涌水量为3 000～10 000 $\mathrm{m^3/d}$。汇总跃龙门隧道下穿高川河段风险评价结果如表5所示。



图5 开挖结果验证[14]

Fig. 5 Verification by excavation result[14]

从相关文献中[14]得知，隧道穿越高川河时恰逢雨季，地表降水对洞内涌水影响较大，掌子面涌水量可以达到7 000 m^3/d(图5)，这与预测的水量范围一致。证明所提出的浅埋穿河段评价体系及SPA预测水量方法是可行有效的。

表5 跃龙门隧道YD2K94+621～YD2K94+701段危险性评价结果

Tab. 5 Risk assessment result of YD2K94+621～YD2K94+701 section in Yuelongmen Tunnel

评价指标	评价值	综合联系度				预测危险性等级	预测涌水量/($m^3 \cdot d^{-1}$)	现场涌水量/($m^3 \cdot d^{-1}$)
		Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ			
I_1	0.104	0.196 6	0.572 7	0.188 0	0.042 7	Ⅱ	3 000～10 000	7 000
I_2	10							
I_3	65							
I_4	70							
I_5	1.5							
I_6	90	$\bar{\mu}'_n=0.199\,6+0.572\,7i_1+0.188\,0i_2+0.042\,7j$						
I_7	70							
I_8	91.411 2							
I_9	12							
I_{10}	51							
I_{11}	85							

4.3 讨 论

1)通过对表2中各评价指标权重比例分析，可以看出，在浅埋穿河隧洞突涌水危险性评价中，地表水、断层和隧道埋深对突水的影响较大，分别占总突水的24.6%、19.4%、13.2%。修正后的地层倾角对突水的影响最小，仅占总突水的2.2%。此处，将地表水流量和地表汇水面积视为突水灾害源，断层、岩性接触带及裂隙发育带视为致灾构造。因此，在浅埋岩溶隧道穿越河流、湖泊、海洋或水库时，若隧址区存在断层破碎带，溶隙、节理发育带，并且富水程度高，岩体质量差时，必须提前做好预防措施，防止地表水侵入隧洞。

2)为了验证该评价方法的合理性，将集对分析模型的评价结果与属性识别法、改进的属性识别法及模糊数学理论的评价结果进行了对比，如表6所示。

从表6可以看出，几种方法的评价结果一致，说明集对分析法的评价结果令人满意。同时，SPA相较于属性识别法及改进的属性识别法，免却了等级确定时单指标属性测度累加的步骤，利用最大隶属度原则可以直观地看出危险性等级，运用简单，使用方便；相较于模糊数学理论，SPA计算的隶属度值对比明显，认为其在突涌水危险性等级界定上更加精确可信。因此，SPA在突涌水危险性等级评价中具有较好的精确度和使用性。

表6 集对分析法与其他方法评价结果对比

Tab. 6 Comparison of evaluation results between set pair analysis and other methods

评价样本	评价方法	隶属度				危险性等级	现场实际结果
		Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ		
跃龙门隧道	SPA	0.196 6	0.572 7	0.188 0	0.042 7	Ⅱ	Ⅱ
	属性识别法	0.298 6	0.280 5	0.338 9	0.082 0	Ⅱ	Ⅱ
	改进的属性识别法	0.298 6	0.280 5	0.332 4	0.088 5	Ⅱ	Ⅱ
	模糊综合评价法	0.248 0	0.362 0	0.140 3	0.251 7	Ⅱ	Ⅱ

5 结 论

1)本研究从工程地质、地质构造、水文地质及隧洞特征4个方面对岩溶区浅埋穿河隧道突涌水进行分析,选取了地层岩性、修正的岩层倾角、可溶岩与非可溶岩接触带、围岩等级、断层带宽度、断层性质、裂隙发育程度、地表水流量、地表汇水面积、隧道埋深、施工干扰程度共11个典型致灾因子,建立了岩溶区浅埋穿河隧道突涌水危险性评价的集对分析模型,为岩溶区浅埋穿河隧道突涌水风险评估提供了一种有效的方法。

2)应用建立的集对分析模型对成兰铁路跃龙门隧道下穿高川河段突涌水风险进行了评价,通过与现场施工情况和属性识别法、模糊综合评价法的对比分析,验证了集对分析模型评价岩溶区浅埋穿河隧道突涌水危险性的可行性及合理性。

3)岩溶区浅埋穿河隧道突涌水灾害爆发突然、危害极大,其地质条件复杂且致灾因子较多。本研究仅针对工程地质、地质构造、水文地质及隧洞特征进行了突涌水风险初步静态评估,在施工过程中应对工程的动态监测数据实时反馈,应用集对分析模型精准评估施工期各阶段的突涌水动态风险等级。

参考文献:

[1] 李术才,周宗青,李利平,等.岩溶隧道突水风险评价理论与方法及工程应用[J].岩石力学与工程学报,2013,32(9):1858-1867.
LI Shucai,ZHOU Zongqing,LI Liping,et al. Risk evaluation theory and method of water inrush in karst tunnels and its applications[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering,2013,32(9):1858-1867(in Chinese).

[2] LI S C,ZHOU Z Q,LI L P,et al. Risk assessment of water inrush in karst tunnels based on attribute synthetic evaluation system[J]. Tunnelling and underground space technology,2013,38:50-58.

[3] 周宗青,李术才,李利平,等.岩溶隧道突涌水危险性评价的属性识别模型及其工程应用[J].岩土力学,2013,34(3):818-826.
ZHOU Zongqing,LI Shucai,LI Liping,et al. Attribute recognition model of fatalness assessment of water inrush in karst tunnels and itsapplication[J]. Rock and soil mechanics,2013,34(3):818-826(in Chinese).

[4] CHU H D,XU G L,YASUFUKU N,et al. Risk assessment of water inrush in karst tunnels based on two-class fuzzy comprehensive evaluation method[J]. Arabian journal of geosciences,2017,10(7):179.

[5] LI L P,LEI T,LI S C,et al. Risk assessment of water inrush in karst tunnels and software development[J]. Arabian journal of geosciences,2015,8(4):1843-1854.

[6] PENG Y X,WU L,ZUO Q J,et al. Risk assessment of water inrush in tunnel through water-rich fault based on AHP-cloud model[J]. Geomatics natural hazards and risk,2020,11(1):301-317.

[7] 王媛,金华,李冬田.裂隙岩体深埋长隧洞断裂控水模型及突、涌水量多因素综合预测[J].岩石力学与工程学报,2012,31(8):1567-1573.
WANG Yuan,JIN Hua,LI Dongtian. Fault-dominated water model and multifactor method for predicting water inflow and inrush of deep long tunnel in fractured rock masses[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering,2012,31(8):1567-1573(in Chinese).

[8] 张顶立,孙振宇,宋浩然,等.海底隧道突水演化机制与过程控制方法[J].岩石力学与工程学报,2020,39(4):649-667.
ZHANG Dingli,SUN Zhenyu,SONG Haoran,et al. Water inrush evolutionary mechanisms of subsea tunnels and process control method[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering,2020,39(4):649-667(in Chinese).

[9] 许振浩,李术才,李利平,等.基于层次分析法的岩溶隧道突水突泥风险评估[J].岩土力学,2011,32(6):1757-1766.
XU Zhenhao,LI Shucai,LI Liping,et al. Risk assessment of water or mud inrush of karst tunnels based on analytic hierarchy process[J]. Rock and soil mechanics,2011,32(6):1757-1766(in Chinese).

[10] LI X P,LI Y N. Research on risk assessment system for water inrush in the karst tunnel construction based on GIS:Case study on the diversion tunnel groups of the Jinping II Hydropower Station[J]. Tunnelling and underground space technology,2014,40:182-191.

[11] WANG Y C,JING H W,YU L Y,et al. Set pair analysis for risk assessment of water inrush in karst tunnels[J]. Bulletin of engineering geology and the environment,2017,76(3):1199-1207.

[12] ISMAIL M A M,MAJID T A,GOH C O,et al. Geological assessment for tunnel excavation under river with shallow overburden using surface site investigation data and electrical resistivity tomography[J]. Measurement,2019,144:260-274.

[13] GUO X,CHAI J R,QIN Y,et al. Mechanism and treatment technology of three water inrush events in the Jiaoxi river tunnel in Shaanxi,China[J]. Journal of performance of constructed facilities,2019,33(1):04018098.

[14] 鲜国,石少帅,赵勇,等.强富水隧道下穿河段突涌水灾害综合

防控方法研究与应用[J]. 隧道与地下工程灾害防治,2019,1(2):74-82.

XIAN Guo,SHI Shaoshuai,ZHAO Yong,et al. Research and application of comprehensive prevention and control method for water inrush in water enriched under-crossing river tunnel[J]. Hazard control in tunnelling and underground engineering,2019,1(2):74-82 (in Chinese).

[15] 王祥. 全断面帷幕注浆措施在贵阳市轨道交通 1 号线下穿南明河段区间隧道的应用研究[J]. 工程技术研究,2016(6):93-95.

WANG Xiang. Full section curtain grouting measure in Guiyang Rail Transit Line Ⅰ application research of tunnel in Nanming reach[J]. Engineering and technological research,2016(6):93-95 (in Chinese).

[16] 赵克勤. 集对分析及其初步应用[M]. 杭州:浙江科学技术出版社,2000.

[17] 许增光,王亚萍,肖瑜,等. 长深隧洞突涌水危险性等级指标及评价方法[J]. 中国公路学报,2018,31(10):91-100.

XU Zengguang,WANG Yaping,XIAO Yu,et al. Risk rating index and evaluationmethod for water inrush in long-deep tunnels[J]. China journal of highway and transport,2018,31(10):91-100(in Chinese).

[18] 杨卓,戎晓力,卢浩,等. 基于熵权物元可拓理论的隧道塌方风险评估[J]. 安全与环境学报,2016,16(2):15-19.

YANG Zhuo,RONG Xiaoli,LU Hao,et al. Risk assessment on the tunnel collapse probability by the theory of extenics in combination with the entropy weight and matter-element model[J]. Journal of safety and environment,2016,16(2):15-19(in Chinese).

[19] 王迎超,徐兴华,刘永莉,等. 公路隧道围岩分级的集对分析模型[J]. 哈尔滨工业大学学报,2011,43(4):114-119.

WANG Yingchao,XU Xinghua,LIU Yongli,et al. Set pair analysis model in surrounding rock classification of highway tunnel[J]. Journal of Harbin Institute of Technology,2011,43(4):114-119 (in Chinese).

[20] 王广月,齐波,付志前. 地基处理决策的集对分析模型及其应用[J]. 岩土力学,2003,24(增刊2):85-87.

WANG Guangyue,QI Bo,FU Zhiqian. SPA model and application for the decision on ground treatment[J]. Rock and soil mechanics,2003,24(S2):85-87(in Chinese).

[21] SAATY T L. How to make a decision:The analytic hierarchy process[J]. Interfaces,1994,24(6):19-43.

[22] 王涛,侯克鹏,郭振世,等. 层次分析法(AHP)在尾矿库安全运行分析中的应用[J]. 岩土力学,2008,29(增刊1):680-686.

WANG Tao,HOU Kepeng,GUO Zhenshi,et al. Application of analytic hierarchy process to tailings pond safety operation analysis [J]. Rock and soil mechanics,2008,29(S1):680-686(in Chinese).

[23] 程远,刘志彬,刘松玉,等. 基于层次分析法的大跨浅埋公路隧道施工风险识别[J]. 岩土工程学报,2011,33(增刊1):198-202.

CHENG Yuan,LIU Zhibin,LIU Songyu,et al. Risk recognition of construction of large-span and shallow buried-highway tunnels based on analytic hierarchy process[J]. Chinese journal of geotechnical engineering,2011,33(S1):198-202(in Chinese).

[24] 王升. 隧道突涌水灾害区域性动态风险评估与预测预警及工程应用[D]. 济南:山东大学,2016.

(编辑 李坤璐)